

Umbral de luminancia diferencial y Adaptación a la luz

PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 6

Profesora María Cinta Puell

Grado Óptica y Optometría



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID

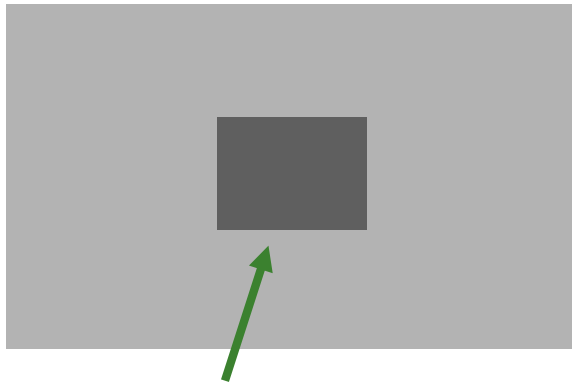
Índice

- Umbral de luminancia diferencial
- Ley de Weber
- Adaptación a la luz
- Constancia de luminosidad
- Sensación luminosa (supraumbral)
- Mecanismos de adaptación a la luz
 - Pupilar, bioquímico, neuronal
- Deslumbramiento
 - Molestia por deslumbramiento
 - Discapacidad visual por deslumbramiento
 - Adaptación por deslumbramiento: tiempo de recuperación

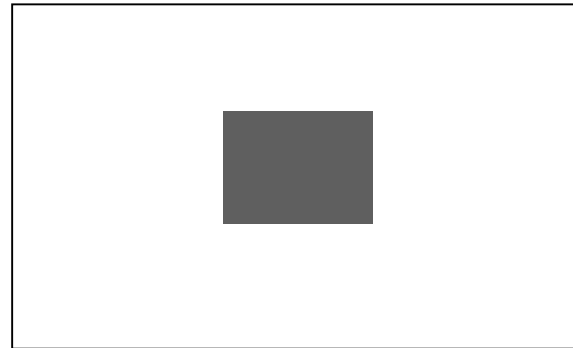
Adaptación a la luz

Habilidad del sistema visual para operar en un amplísimo intervalo de condiciones de luminancia ambiental

Los objetos deben parecer igual de luminosos sin tener en consideración la cantidad de luz que les llega



Una superficie gris debe parecer gris con poca luz



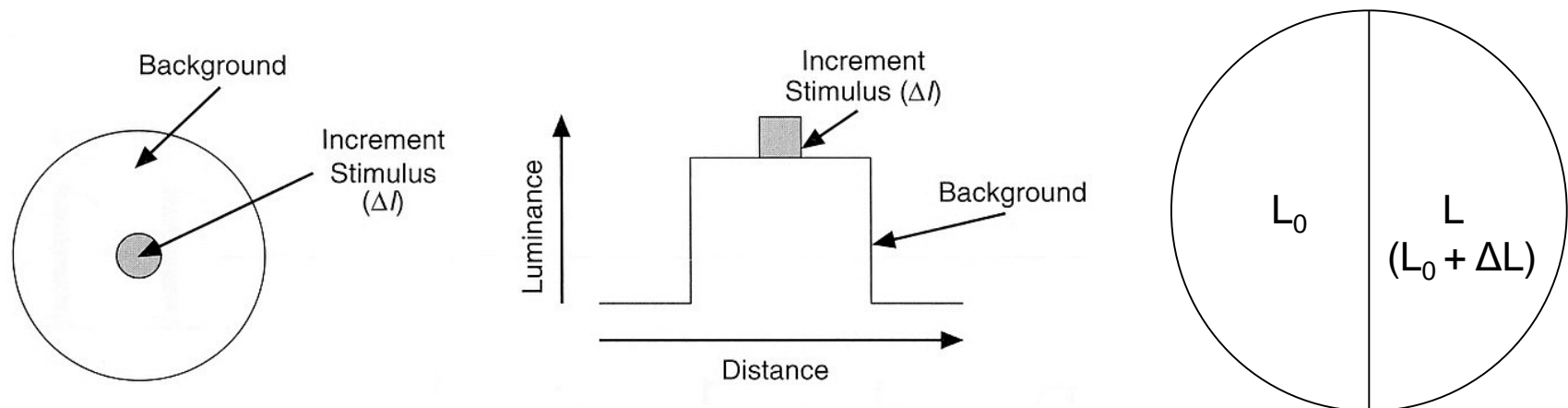
Y con luz brillante

La adaptación a la luz se estudia con procedimientos de **umbral diferencial o incremento**

Umbral de luminancia diferencial

Umbral de incremento o diferencial (ΔI or ΔL): **mínima diferencia de luminancia** perceptible entre dos estímulos con valores idénticos en el resto de los parámetros

$$\text{Sensibilidad luminosa} = 1 / \Delta L$$



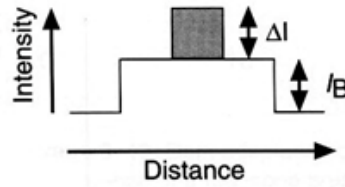
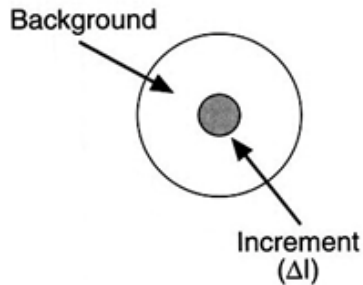
ULD: permite la percepción de los objetos que destacan sobre un fondo iluminado (visión fotópica)

Perimetría clínica: Luminancia del fondo constante (L_B)

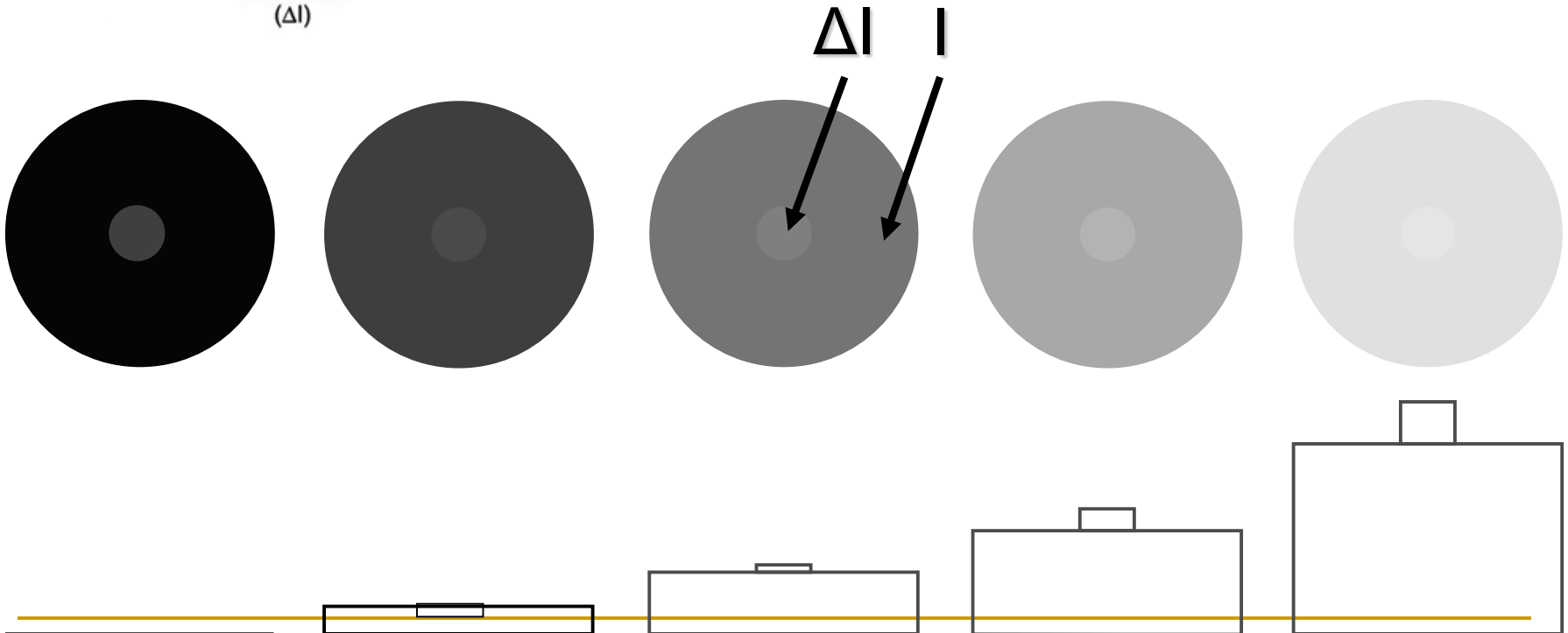
Luminancia del estímulo luminoso ($L_B + \Delta L$)

Umbral diferencial o incremento

El umbral (ΔI) se mide para un destello de luz que se presenta sobre un fondo



Cuando se miden ΔI con distintos niveles de intensidad del fondo (I), el umbral (ΔI) aumenta proporcionalmente al nivel de intensidad (I).

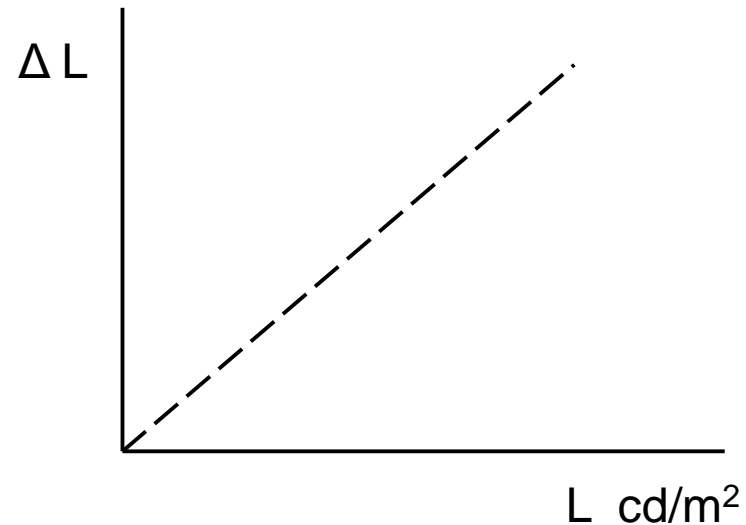
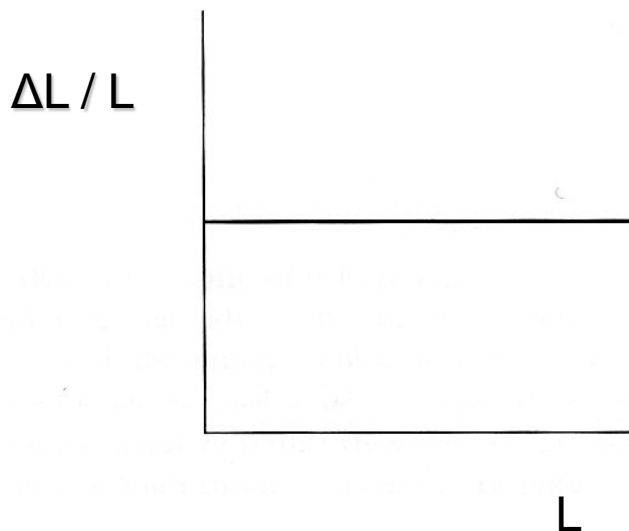


Ley de Weber

Conforme la luminancia de la zona de referencia o fondo (L) aumenta, el umbral de luminancia diferencial (ΔL) debe aumentarse de manera que la relación entre ΔL y L permanezca constante:

$$\frac{\Delta L}{L} = cte$$

Fracción de Weber o Constante de Weber



Ejemplo Ley de Weber

Umbral incremento de peso (ΔP)

100 g y 102 g $\Delta P = 2 \text{ g}$

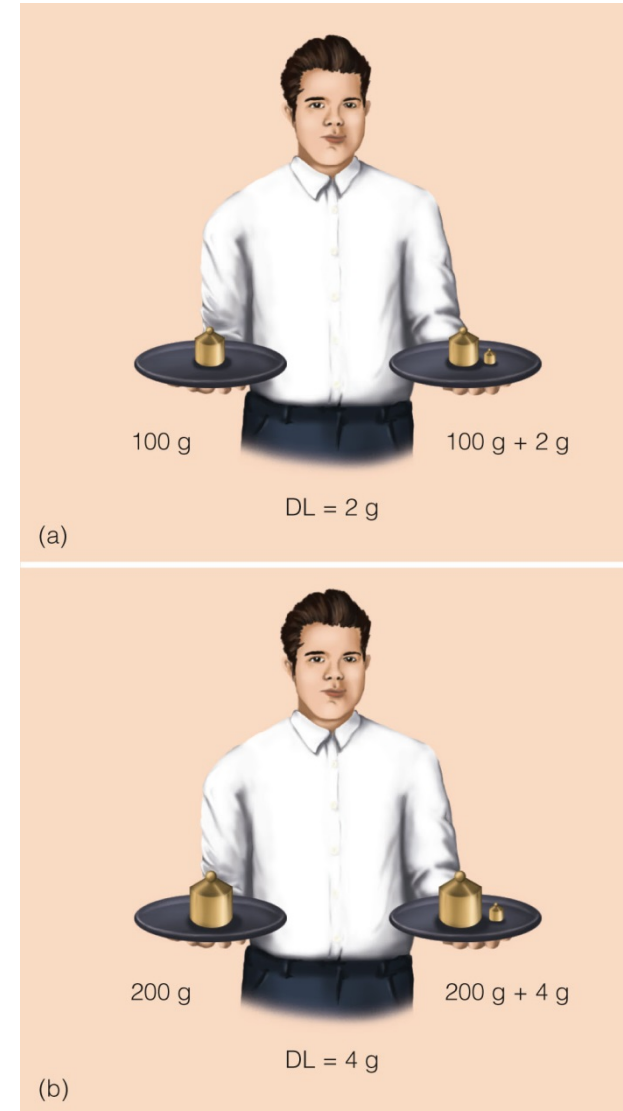
Constante de Weber $\Delta P / P = 2 / 100 = \mathbf{0,02}$

200 g

$\Delta P / 200 = \text{Constante de Weber} = 0,02$

$\Delta P = 4 \text{ g}$

El sujeto puede distinguir entre 200 y 204 g
Pero no puede distinguir entre 200 y 202 g

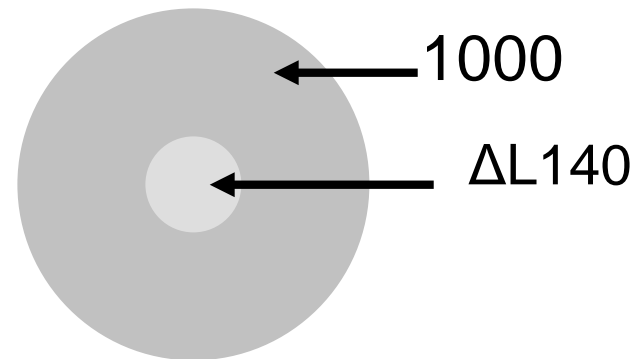
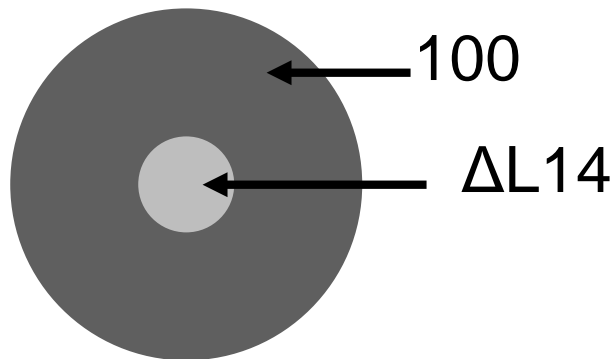


Ley de Weber - bastones

Umbral diferencial – bastones

Fracción de Weber para los bastones

$$\Delta L / L = 0,14 \quad (14\%)$$



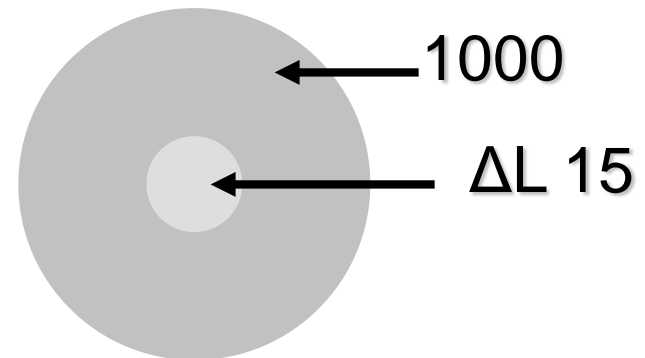
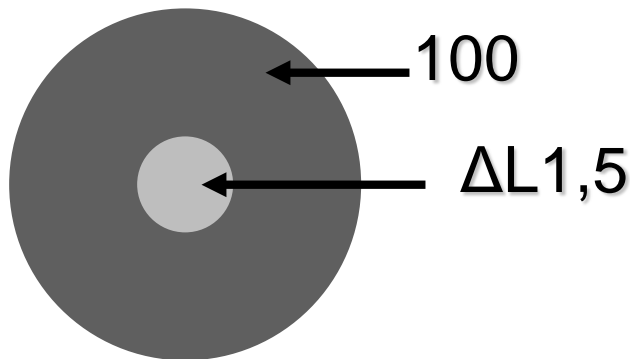
La **sensibilidad relativa** (0,14) no cambia a medida que aumenta la iluminación. Sin embargo, hay una reducción en la **sensibilidad absoluta** (de 14 a 140 unidades)⁸

Ley de Weber - conos

Umbral diferencial - Conos

Fracción de Weber (umbral de contraste) para los conos

$$\frac{\Delta L}{L} = 0,015 \quad (1,5\%)$$



El **sistema fotópico es más sensible al contraste** (fracción de weber = 0,015) que al sistema escotópico (fracción de weber = 0,14)

Ley de Weber

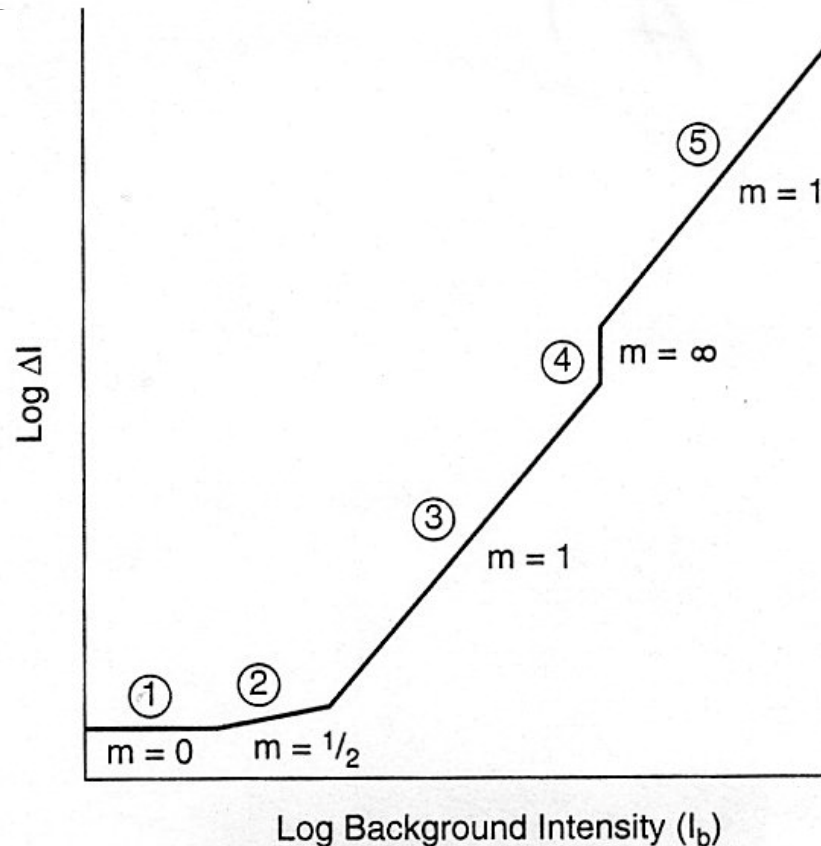
Fracción de Weber = Contraste de Weber

$$C = \frac{L_o - L_f}{L_f} = \frac{\Delta L}{L}$$

- El sistema visual sigue la ley de Weber.
- El **umbral de contraste permanece constante** a medida que cambia la luminancia del fondo (L_f)

Curva de adaptación a la luz

Como cambia el umbral diferencial (ΔI) en función de la intensidad de adaptación del fondo (I_B).



Adaptación a la luz conos

Sección 5: ley de Weber conos

Adaptación a la luz bastones

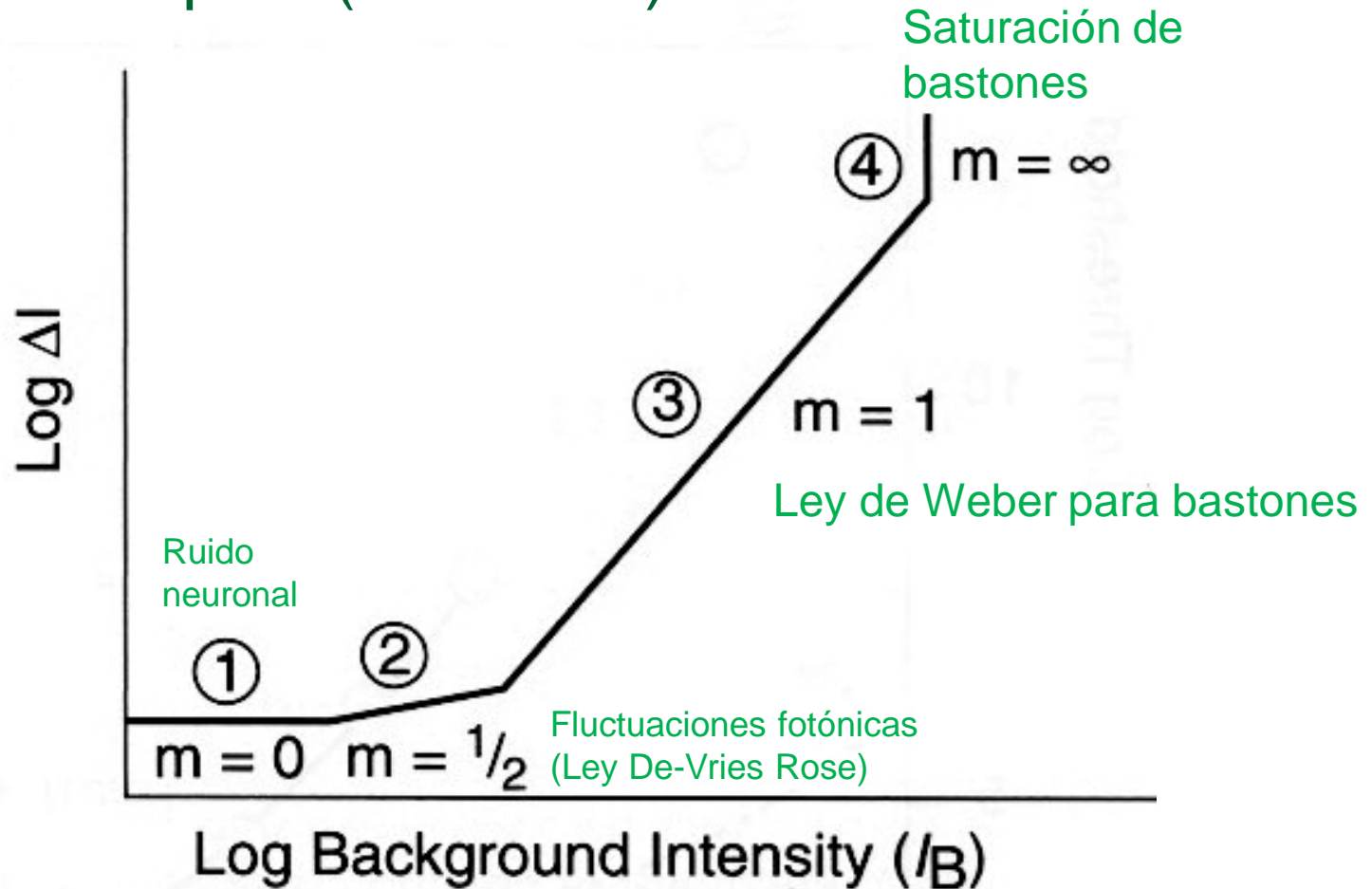
Secciones 1, 2, 3, 4

Sección 3: ley de Weber bastones

Sección 4: saturación de bastones

Curva de adaptación a la luz

Parte escotópica (bastones)



La sección 3 cubre un intervalo de 4 unidades logarítmicas de I del fondo

Monocromatismo de bastones

Visión monocromática de bastones

SATURACIÓN

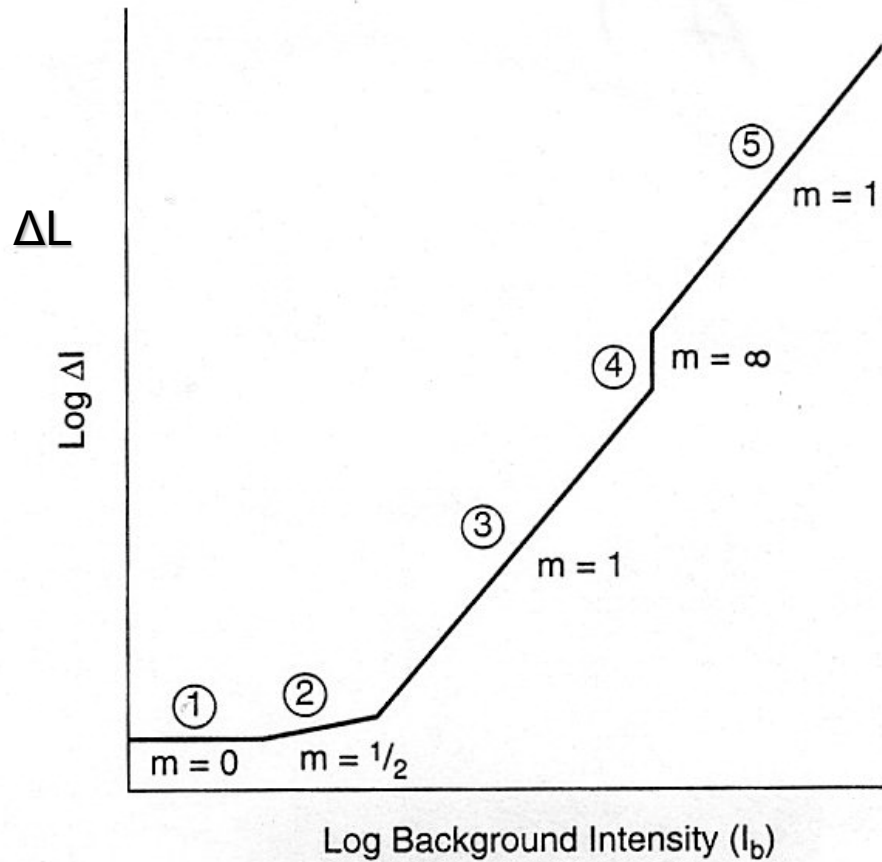
Nivel de luz



Saturación:

- Los bastones no son capaces de señalar el incremento de estímulo.
- Solo se blanquea el 10% de la rodopsina
- Los canales de sodio del segmento externo se cierran
- Más blanqueamiento de rodopsina no da lugar a más hiperpolarización

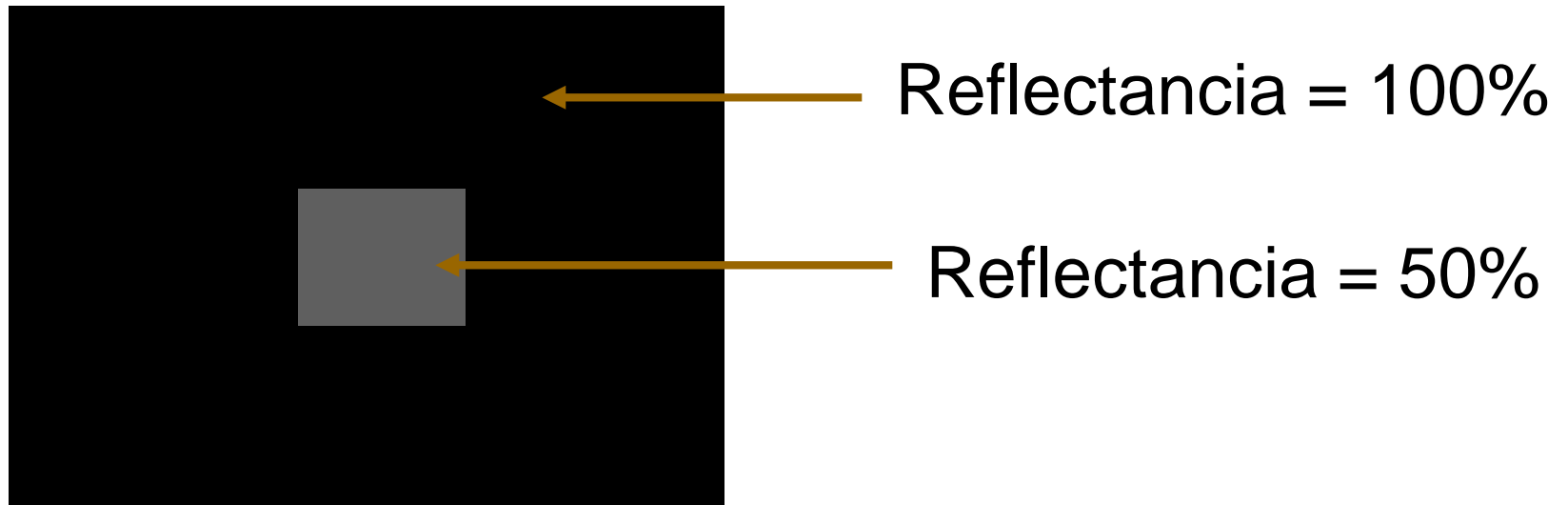
Curva de adaptación a la luz



Parte fotópica (5)
Ley de Weber conos

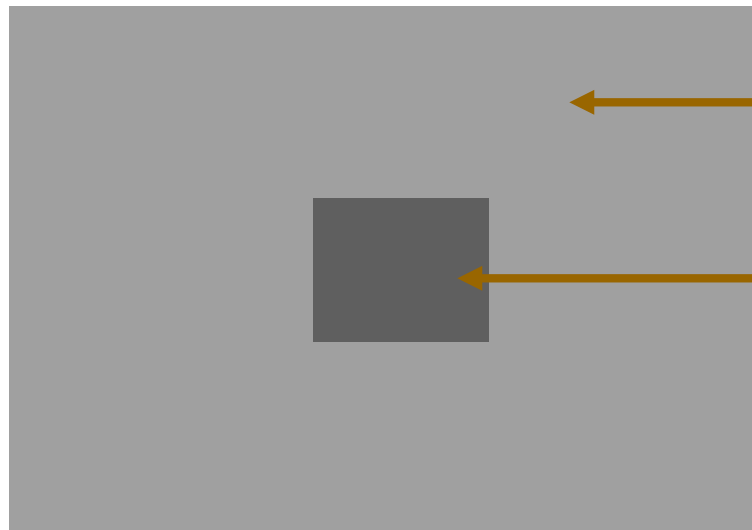
Ley de Weber

Considerar la siguiente situación...



Ley de Weber

Si la superficie se ilumina con 100 unidades de luz...



Luminancia = 100

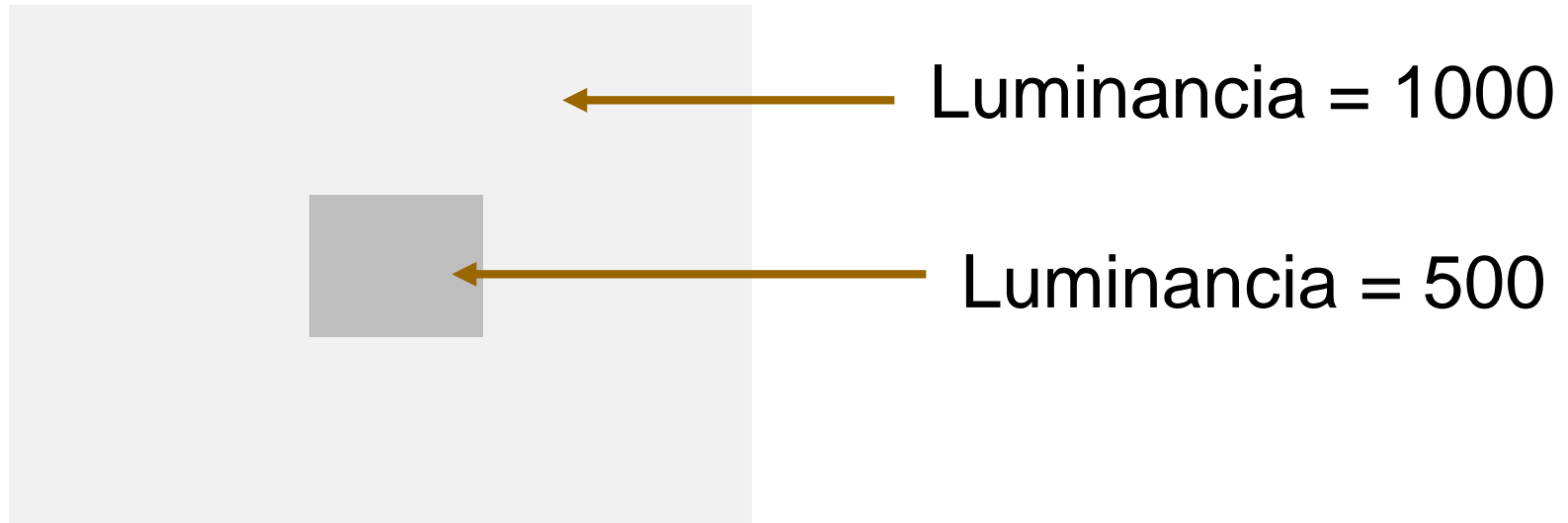
Luminancia = 50

Luminancia diferencia = 50

$\Delta L/L = 0,5$

Ley de Weber

Si la superficie se ilumina con 1000 unidades de luz...



Luminance diferencia = 500

$$\Delta L/L = 0,5$$

Debido a que el contraste $\Delta L/L$ permanece constante, la apariencia luminosa o brillo del cuadro interior sigue siendo la misma

Constancia de luminosidad

Constancia de luminosidad o brillo

Es la habilidad del sistema visual para mantener **constante** el brillo o luminosidad de los objetos.

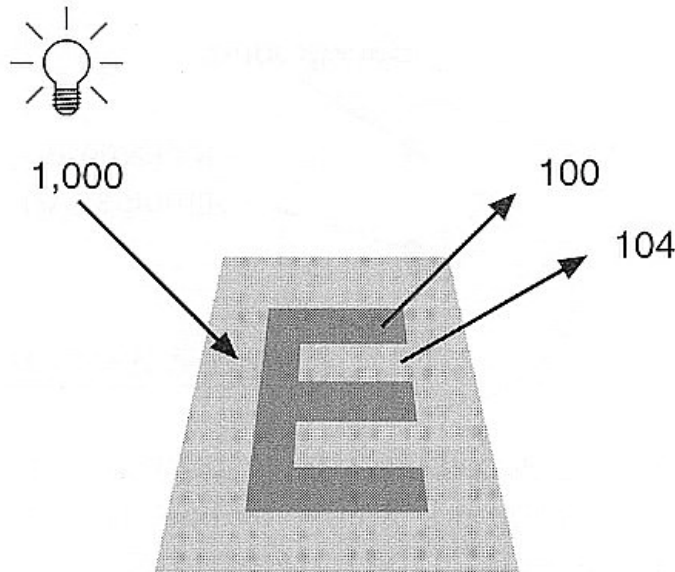
La característica constante es el ratio $\Delta L / L$

Constancia de luminosidad

La constancia de luminosidad depende de que la iluminación caiga **tanto sobre el objeto como sobre el fondo.**

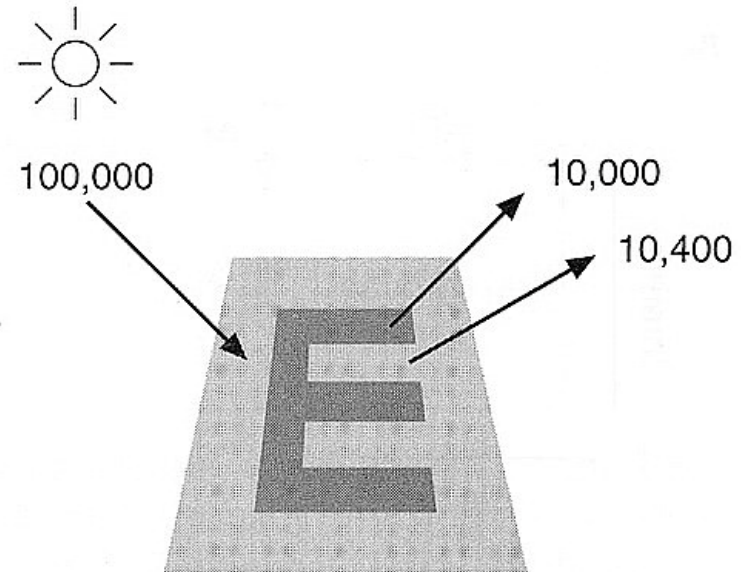
Constancia de luminosidad

El optotipo refleja el 10% de la luz incidente, y el fondo refleja el 10,4%



$$\Delta L = 4 \text{ cd/m}^2$$

$$\Delta L / L = 4/104 = 0,038 \quad (3,8\%)$$



$$\Delta L = 400 \text{ cd/m}^2$$

$$\Delta L / L = 400/10400 = 0.038 \quad (3,8\%)$$

Contraste de Weber $\Delta L/L$ constante

El contraste del optotipo (3,8%) es superior al umbral de contraste fotópico 0,015 (1,5%)

La apariencia de la E es la misma (el contraste permanece constante) en condiciones de iluminación tenue y brillante: **Constancia de luminosidad**

Constancia de luminosidad

Conforme aumenta la intensidad o luminancia del fondo, el umbral diferencial aumenta (Ley de Weber)

Consecuentemente, la **sensibilidad absoluta disminuye**, mientras que la **sensibilidad relativa permanece constante**.

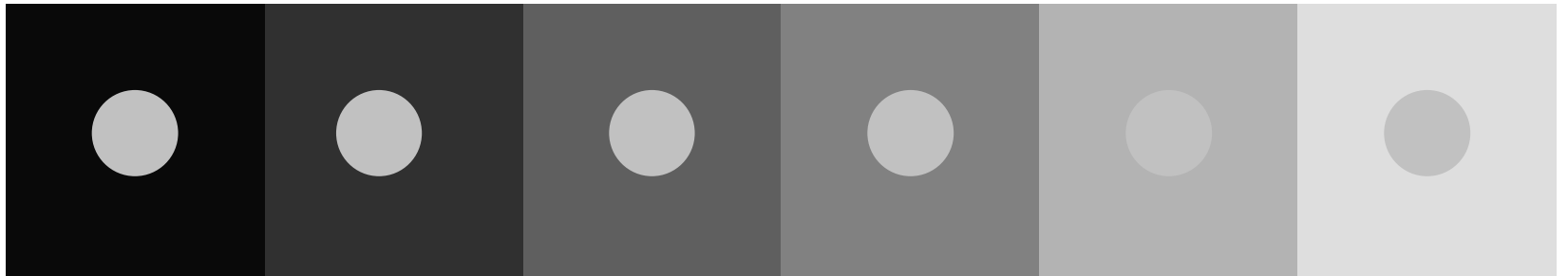
Regulación de la sensibilidad

El resultado es un **contraste constante** independientemente del brillo del fondo.

Contraste simultáneo

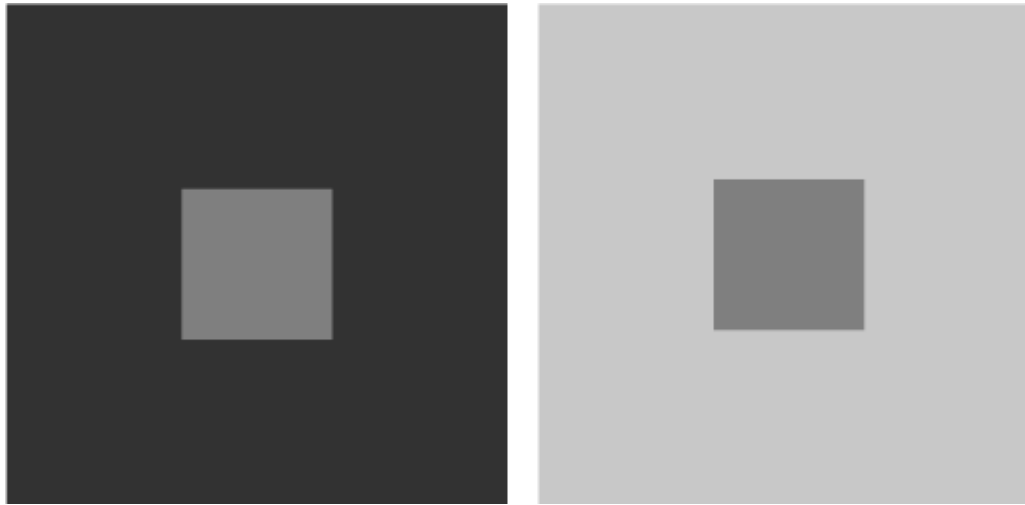
Cambiar la luminancia del entorno o fondo sin cambiar la luminancia del objeto produce un cambio en la luminosidad percibida.

Contraste de brillo simultáneo



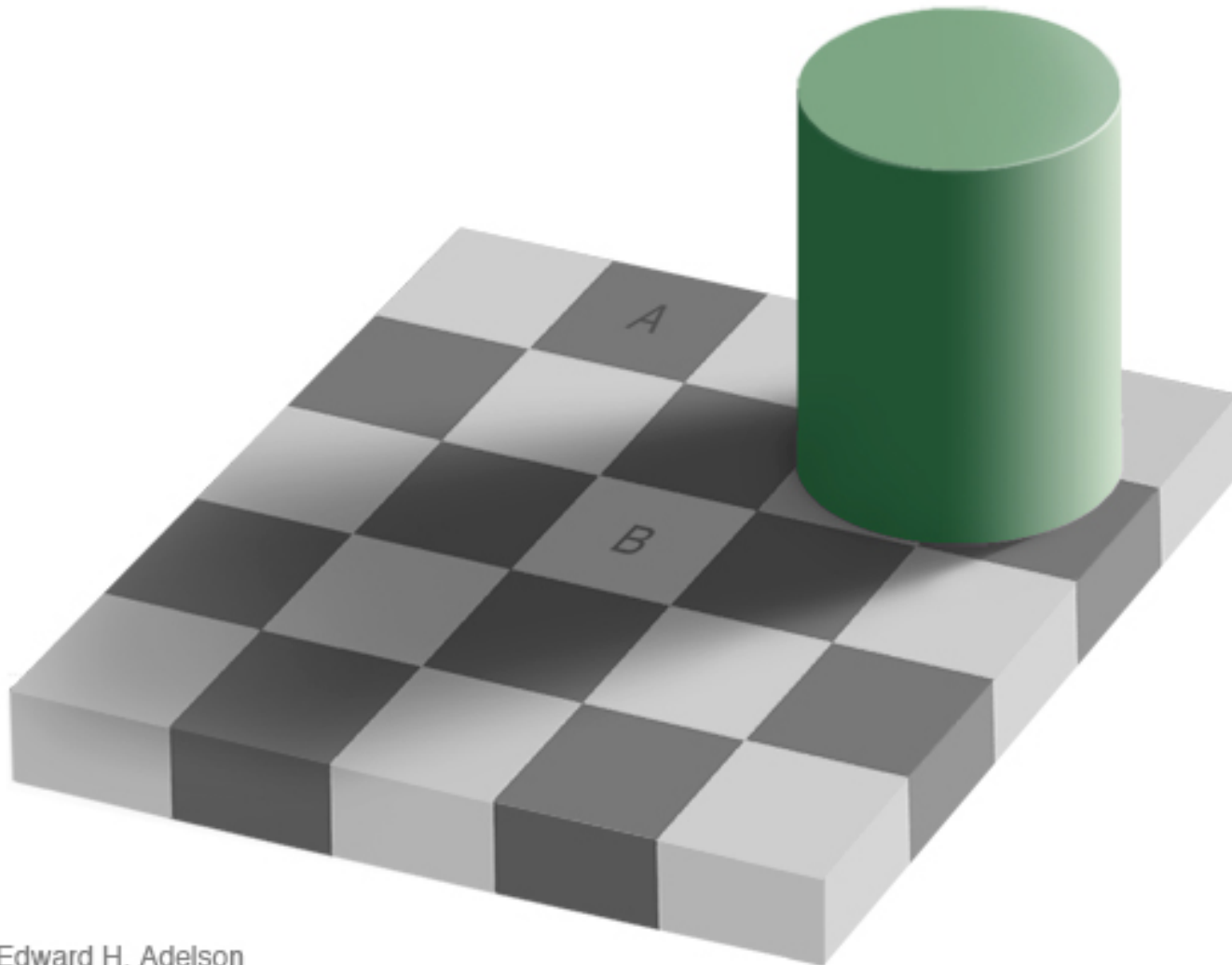
Contraste simultáneo

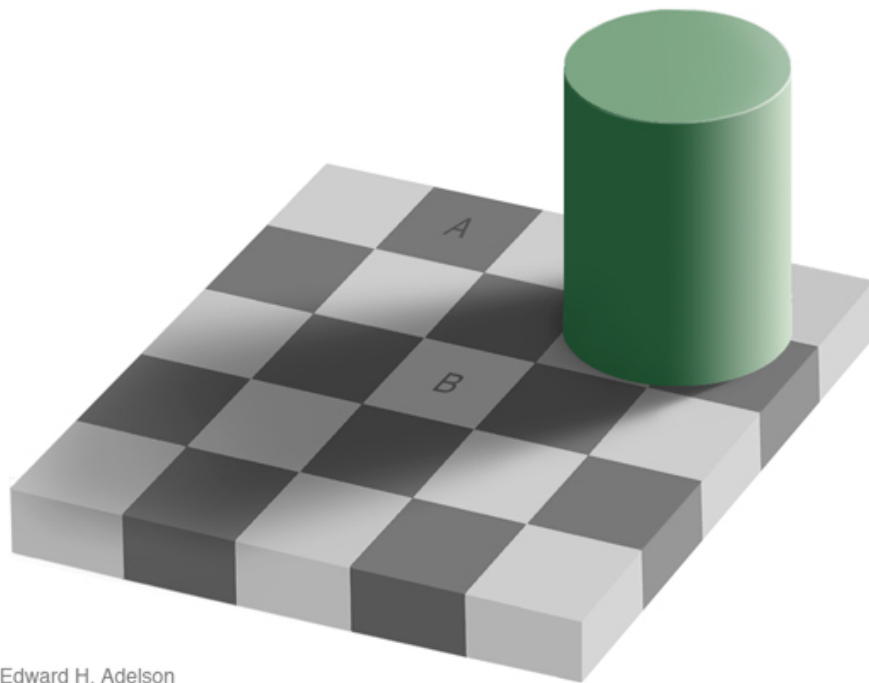
Apariencia de un estímulo de luminancia constante cuando se observa contra dos fondos de distinta luminancia



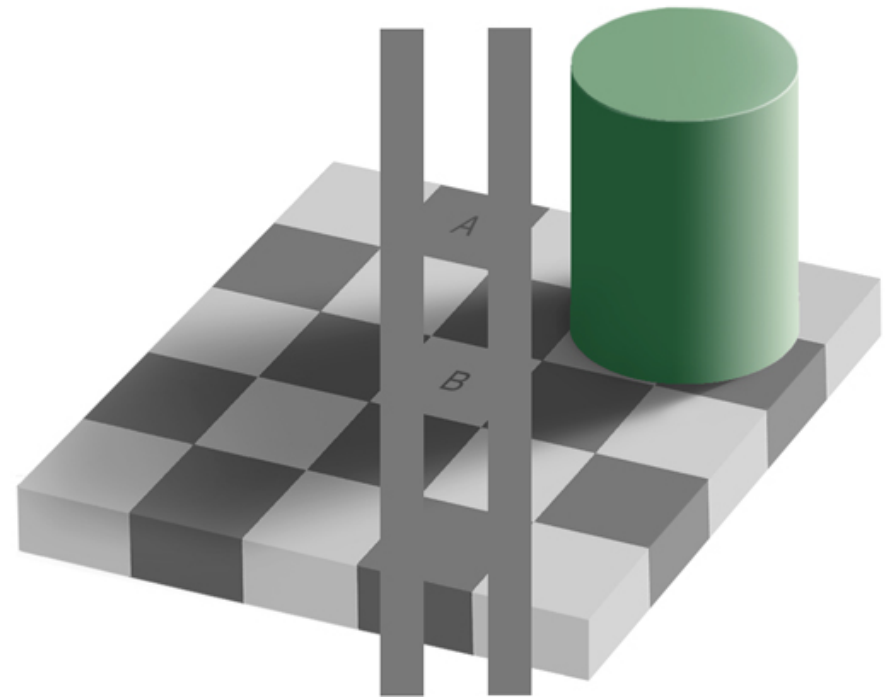
Los dos cuadrados grises centrales son físicamente idénticos (igual luminancia)

El brillo de un objeto está influenciado por el brillo del entorno





Edward H. Adelson



El factor clave para predecir la apariencia de un estímulo es el contraste del estímulo (ley de Weber) y no su luminancia

Magnitud de sensación

¿Cuál es la relación entre la magnitud de la sensación y la intensidad del estímulo?

Si la intensidad de una bombilla se duplica, ¿parecerá el doble de brillante?

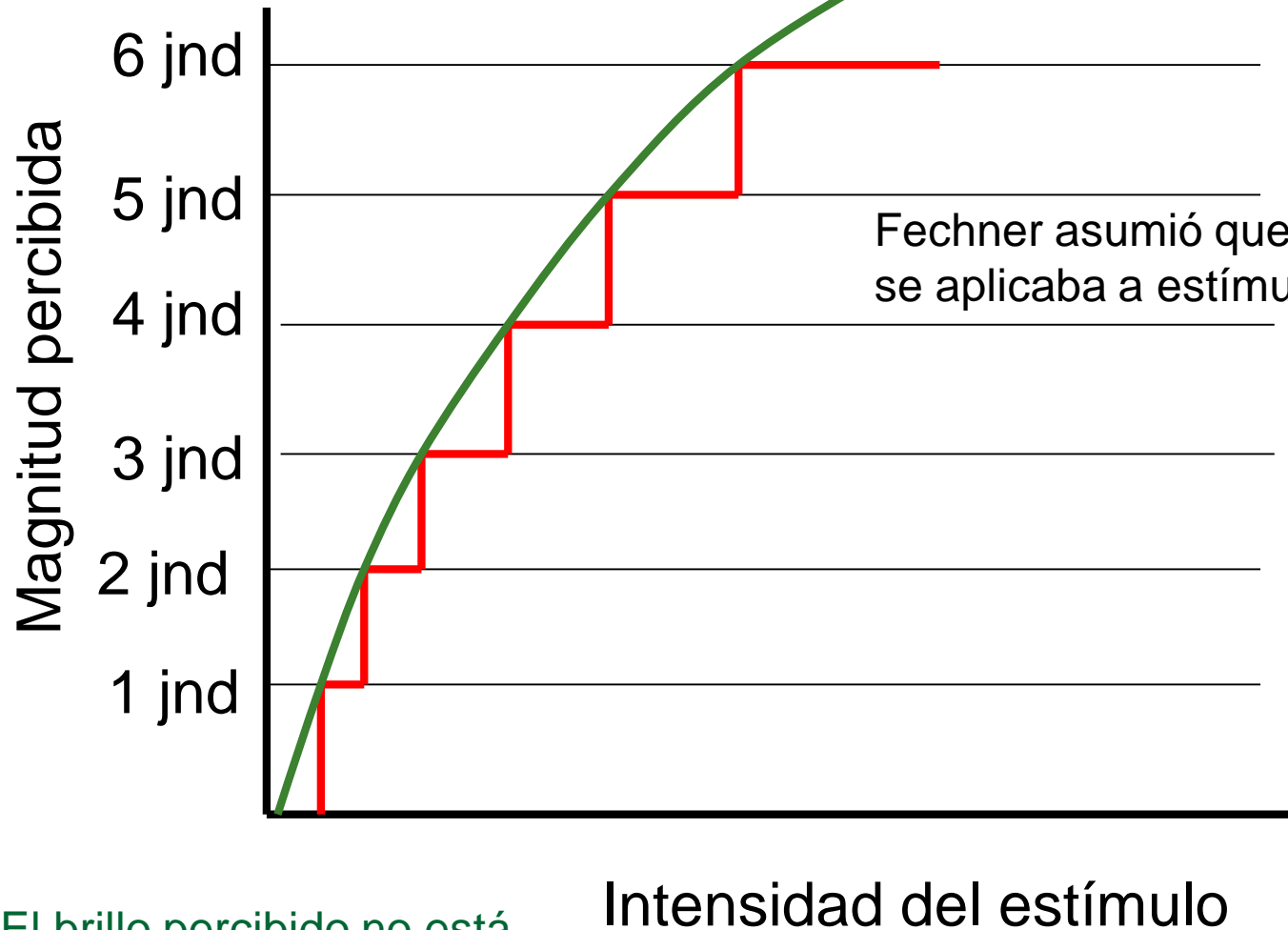
Los estímulos que exceden el umbral son supraumbral

Escala sensorial



Esta escala parece aumentar en pasos iguales de brillo.

¿A cada escalón de aumento de la intensidad luminosa (dl) le corresponde un aumento constante de la sensación dS ?



Fechner asumió que la ley de Weber se aplicaba a estímulos supraumbral

El brillo percibido no está relacionado linealmente con la intensidad (o luminancia)

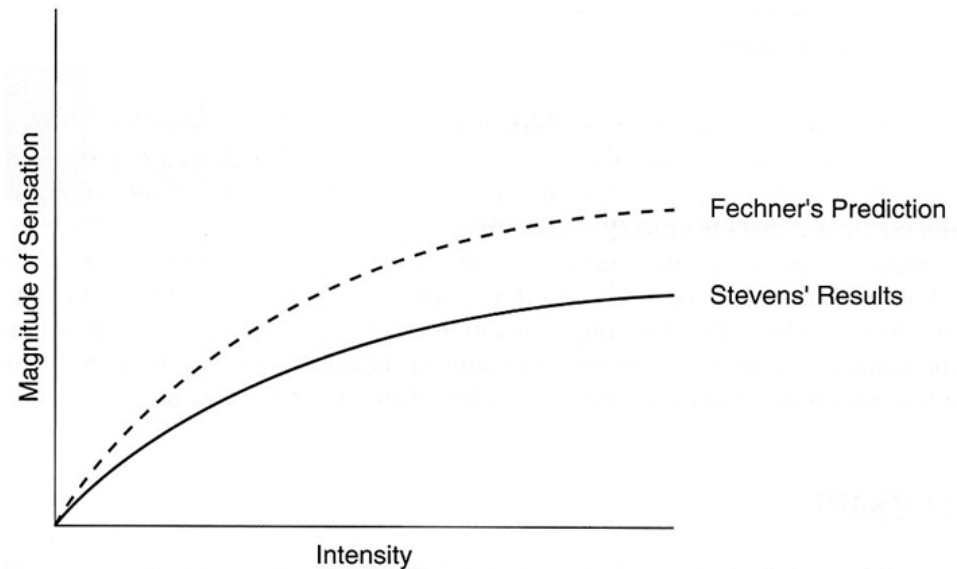
$$\text{Magnitud percibida} \propto \log (\text{intensidad})$$

Magnitud de sensación

- Ley logarítmica de Fechner:
la magnitud de la sensación es proporcional al logaritmo (intensidad del estímulo) $S = K \cdot \log I$

Esta relación exponencial es cuestionable.

- Ley de potencia de Steven: *la magnitud de la sensación es proporcional a (intensidad del estímulo) elevada a una potencia*
 $S = I^K$



Una relación constante de la estimulación produce una relación constante de la sensación

Mecanismos de adaptación a la luz

- Mecanismo pupilar
- Mecanismo neuronal: ganancia post-receptor
- Mecanismo bioquímico: cambios de la concentración de pigmentos en FR
- Se diferencian en
 - La rapidez
 - La extensión de la respuesta a los cambios de luz

Mecanismo pupilar

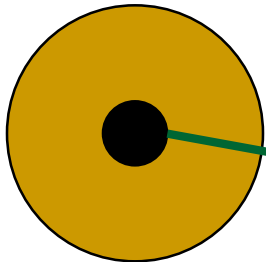
- El tamaño de la pupila se altera aproximadamente en 1 segundo
- la cantidad de luz que entra en el ojo puede cambiar en un factor de hasta aproximadamente 16 (aproximadamente una unidad logarítmica)
- Los cambios en el área pupilar afectan sólo a una pequeña porción de la adaptación a la luz

Mecanismo pupilar

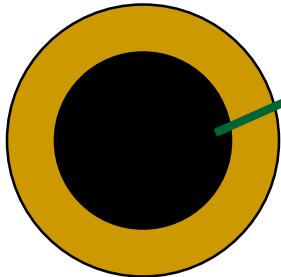
La iluminación retiniana es proporcional al area pupilar

$$A = \pi r^2$$

Reducción en la cantidad de luz que alcanza la retina



$$d = 3 \text{ mm} \quad A = 2,25 \pi$$



$$d = 9 \text{ mm} \quad A = 20,25 \pi$$

$$\text{Ratio} = 20,25 : 2,25 = 9 : 1 = 9 \\ \approx 1 \text{ unidad logarítmica}$$

Mecanismo neuronal

- Pocos milisegundos
- Ajusta la sensibilidad de la retina para cambios de intensidad luminosa de 3 unidades logarítmicas
- Cambios rápidos y profundos en el tamaño de los campos receptores.
 - Adaptación a la luz: disminuye el tamaño del CR.

Mecanismo bioquímico

- Cambios en la concentración de los fotorpigmentos que normalmente estaban en un estado constante
- Algunos minutos
- Pueden alterar la sensibilidad del ojo en un rango de intensidad de 1-8 unidades logarítmicas

Fases de adaptación a la luz

- Fase rápida
 - Pone en juego toda la retina
 - Mecanismo neuronal
- Fase relativamente más lenta
 - Limitada a la región retiniana estimulada
 - Mecanismo fotoquímico

Deslumbramiento

- Molestia visual transitoria acompañada por una disminución de las facultades visuales
- Provocado por un exceso de luz con relación al:
 - ❑ estado de adaptación
 - ❑ extensión y duración de la estimulación

Clases de deslumbramiento

- Deslumbramiento molesto
- Discapacidad por deslumbramiento (disability glare)
- Deslumbramiento por adaptación a la luz
 - Tiempo de recuperación al deslumbramiento

Deslumbramiento molesto

- Sensación de molestia en algunas situaciones de luminosidad intensa
- Se reduce con gafas de sol
- No provoca una disminución en la visión

Índice de deslumbramiento molesto

$$D = \frac{\Omega \cdot L_{fuente}}{\varphi \cdot L_{fondo}}$$

Ω ángulo sólido que ocupa la fuente luminosa

φ ángulo que forma la dirección de la fuente luminosa con el eje visual

Escala de criterio para juzgar la iluminación

- Justamente perceptible (D = 10)
- Justamente aceptable (D = 16)
- Justamente incómoda (D = 22)
- Justamente intolerable (D = 28)

Discapacidad por deslumbramiento

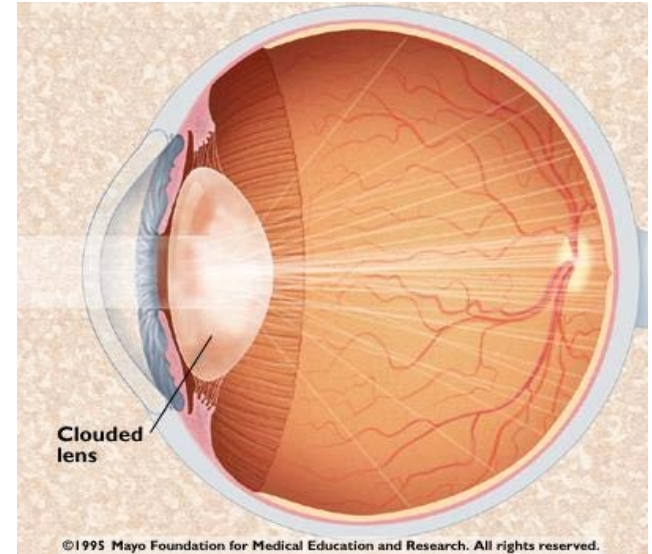
Reducción de la función visual debida a una fuente de deslumbramiento



- **Disminución del contraste** de la imagen debido a la **dispersión de luz**
- Independiente del procesamiento neuronal
- Puede no causar una molestia
- No mejora con gafas de sol que podrían empeorar la situación

Discapacidad por deslumbramiento

Causa:
dispersión de luz hacia delante
(forward scatter)

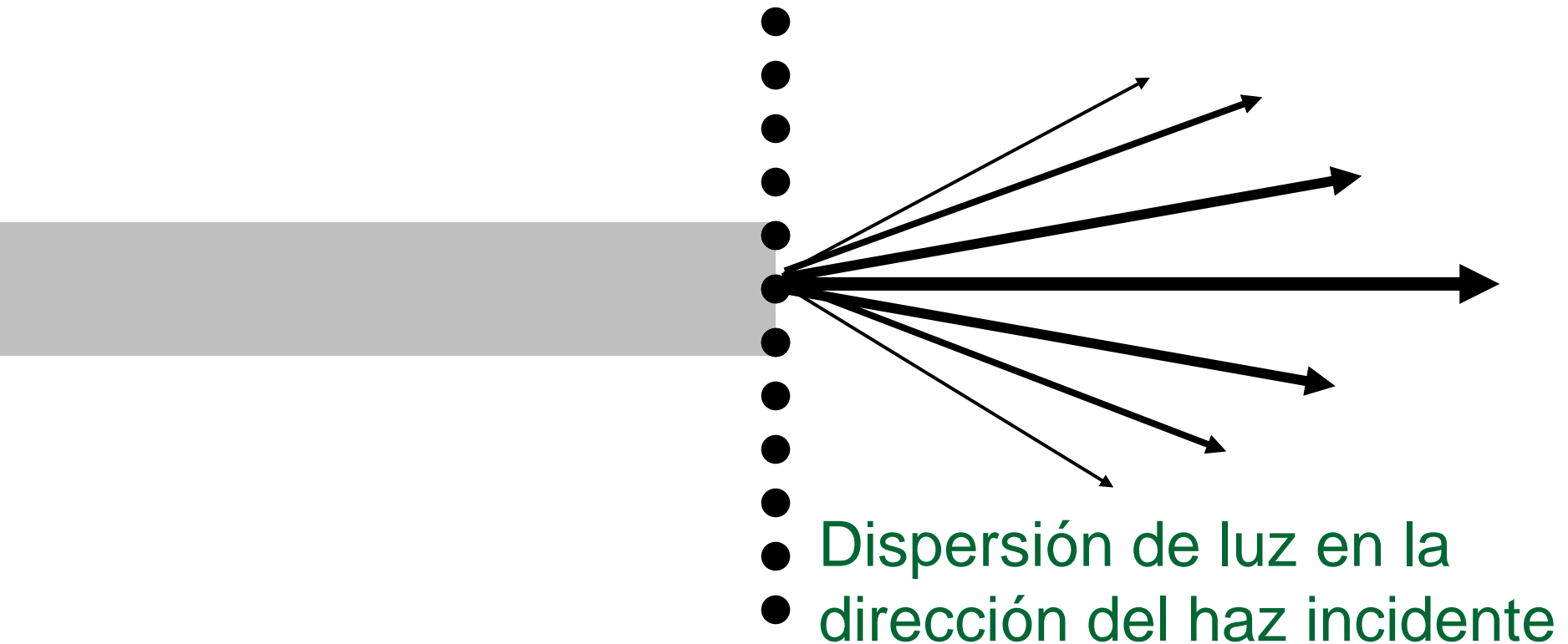


Simulaciones de dispersión de luz causadas por opacidad del cristalino



Dispersión de luz hacia delante


Forward scatter



Causa de la discapacidad por deslumbramiento

Dispersión de luz en el interior del ojo:

- ❑ cambios pequeños e irregulares en el **índice de refracción** de los medios oculares

cristalino  **cataratas**

- ❑ fluorescencia del cristalino

convierte luz incidente UV en luz azul dispersada

- ❑ irregularidades en las superficies oculares

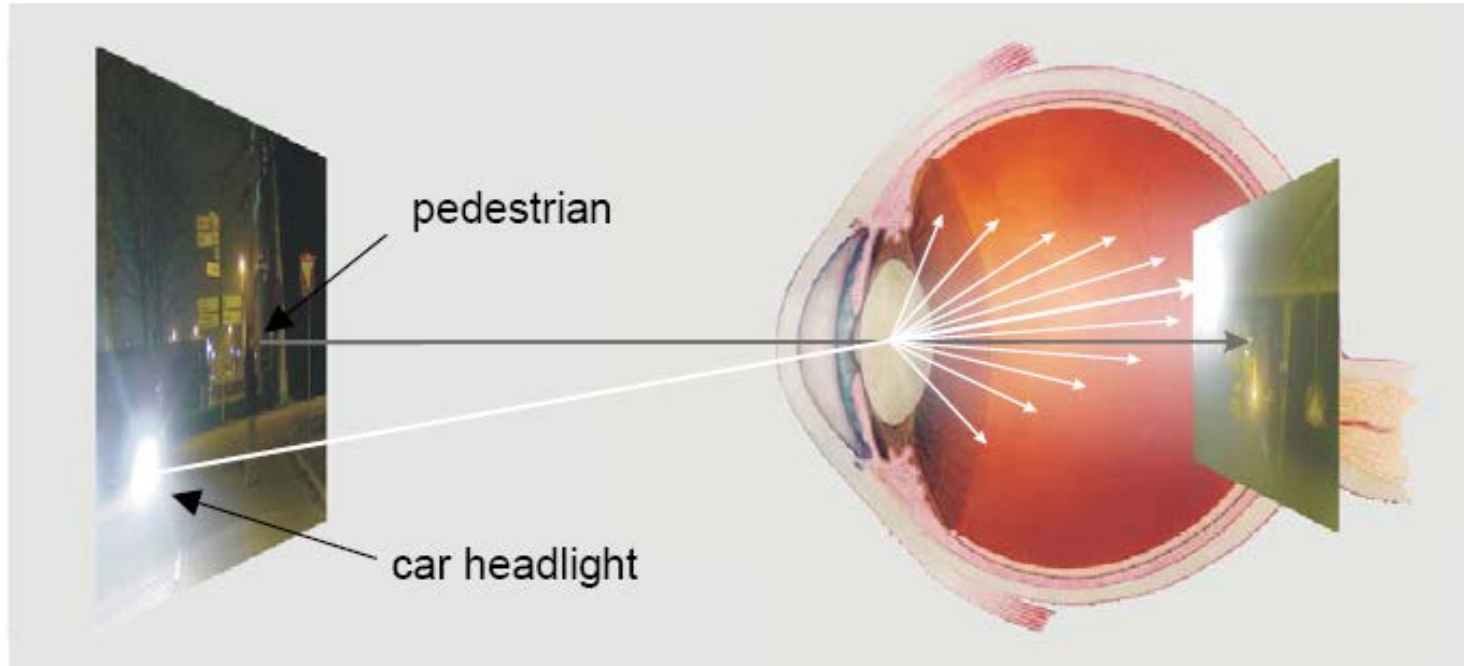
ulceras o edema corneal

Discapacidad por deslumbramiento

- Aumenta con la **edad** (a partir 50 años), incluso en ojos sano sin cataratas
- La **lente del cristalino** desarrolla sitios con dispersion conforme se hace menos transparente
 - Mayor discapacidad con **cataratas**
- Dispersión en la **cornea**
 - Discapacidad por deslumbramiento debido a la **cirugía refractiva**
 - Edema corneal
- Quejas por problemas de **deslumbramiento** especialmente:
 - Con luz solar intensa (amanecer y atardecer)
 - Conduciendo por la noche
- Impacto importante en la movilidad y seguridad

Efectos de la dispersión de luz hacia delante

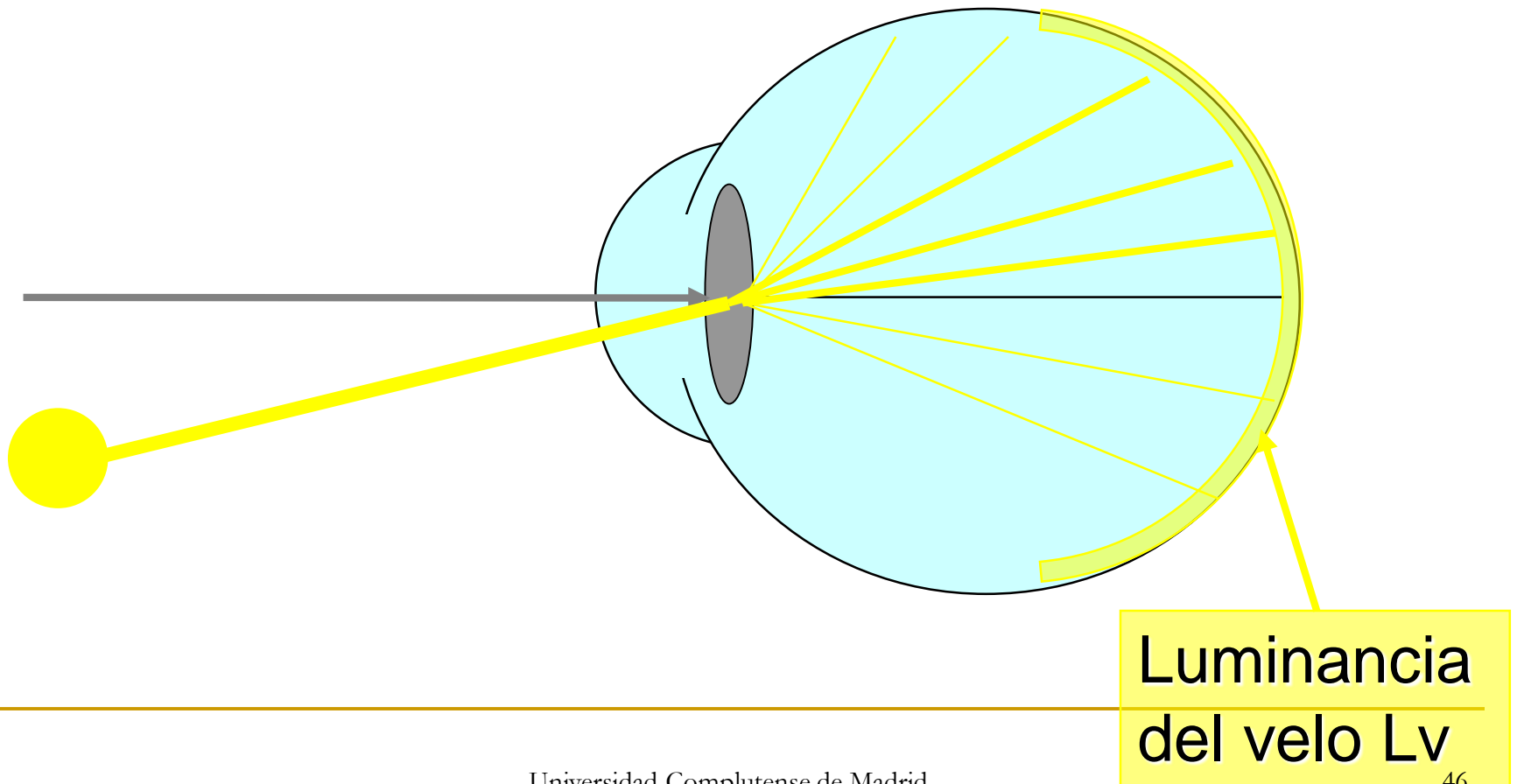
Disminuye la calidad de la imagen retiniana



- Reduce el contraste
- Desatura los colores

Efecto de la dispersión de luz

Luminancia del velo superpuesta a la imagen retiniana



La función de dispersión

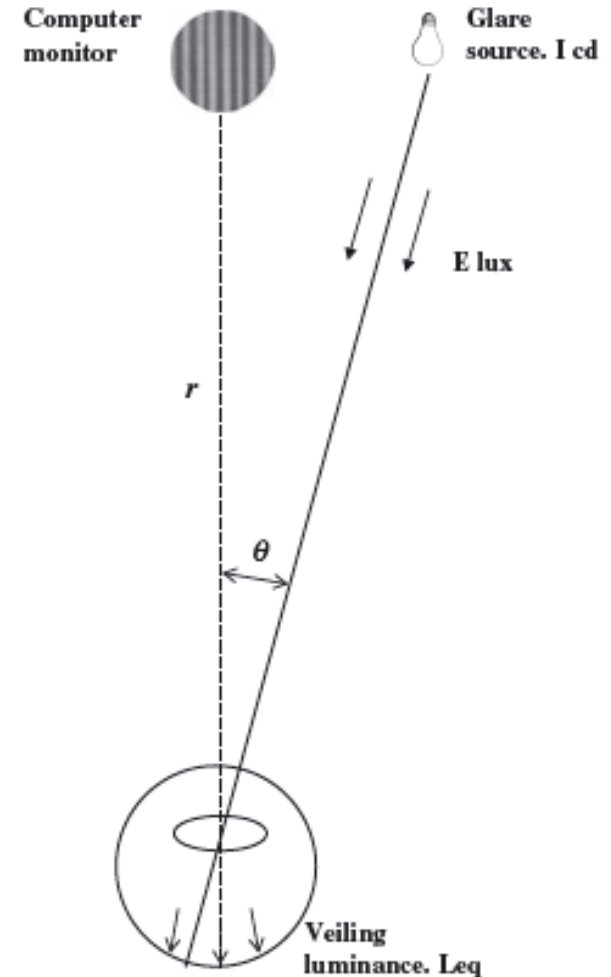
- La luz dispersada se extiende sobre una región retiniana alrededor de la imagen
- Esta iluminancia retiniana se puede igualar a la “luminancia del velo equivalente” $L_v(\theta)$
- Ecuación de Holladay-Stiles para una fuente puntual de deslumbramiento:

$$L_v(\theta) = \frac{10 \cdot E_p}{\theta^2}$$

L_v luminancia del velo en cd/m^2

θ ángulo en grados entre la línea de mirada y la fuente de deslumbramiento $1^\circ < \theta < 30^\circ$

E iluminancia (lux) en el plano de la pupila $E = \frac{I \cdot \cos \theta}{d^2}$



Ejemplo

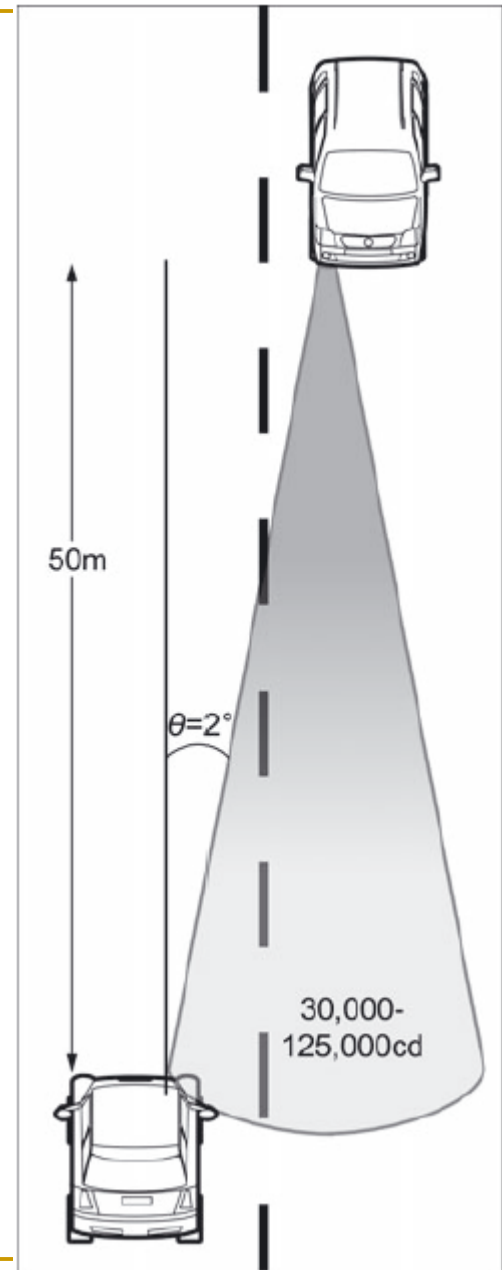
Intensidad del faro del vehículo 30.000 cd

Distancia de visualización 50 metros

$$E = \frac{30,000 \cos(2^\circ)}{50^2} = 12 \text{ lux}$$

$$L_v(2^\circ) = \frac{10.12}{2^2} = 30 \text{ cd/m}^2$$

Cuanto menor sea la distancia angular (θ), mayor será la luminancia del velo por deslumbramiento



Discapacidad por deslumbramiento y su efecto en el contraste

Contraste sin
deslumbramiento

$$C = \frac{L_0 - L_f}{L_f}$$

Contraste con
deslumbramiento

$$C = \frac{(L_0 + L_v) - (L_f + L_v)}{L_f + L_v}$$

La luminancia del velo
disminuye el contraste

$$C = \frac{L_0 - L_f}{L_f + L_v}$$

Discapacidad por deslumbramiento y su efecto en el contraste

Ejemplo

Contraste sin deslumbramiento

$$L_f = 100 \text{ cd/m}^2$$

$$L_o = 20 \text{ cd/m}^2$$

$$C = \frac{L_f - L_o}{L_f} = \frac{100 - 20}{100} = 0,8$$

Con la fuente de deslumbramiento el contraste se reduce a 0,75 (75%)

La luminancia del velo será:

$$C = 0,75 = \frac{(L_f + L_v) - (L_o + L_v)}{L_f + L_v} = \frac{(100 - 20)}{100 + L_v}$$

$$L_v = 6,67 \text{ cd/m}^2$$

Efecto de la dispersión de luz en la A.V. de alto contraste



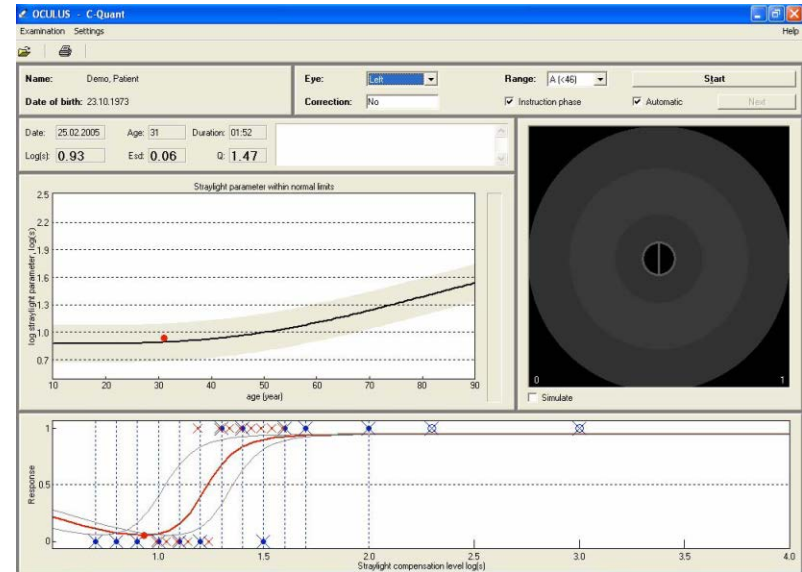
Sorprendentemente poco

Valoración clínica de la discapacidad por deslumbramiento

¿Qué queremos medir?

- La cantidad de dispersión intraocular:
 - Medida de la luminancia del velo L_v a diferentes ángulos
- La función visual en presencia de dispersión
 - Medida del efecto de una fuente de deslumbramiento periférica sobre la pérdida de visión

Cantidad de dispersión intraocular



C-Quant (Oculus)

Mide la cantidad de dispersión de luz intraocular

Método de medida: “comparación por compensación”

Valoración clínica de la discapacidad por deslumbramiento

Se mide el efecto de una fuente de deslumbramiento periférica sobre la agudeza visual (AV) o la sensibilidad al contraste (SC)

- **Índice de discapacidad por deslumbramiento:**

Diferencia entre los valores medidos con y sin la presencia de una fuente de deslumbramiento.

¿Cuánta SC o AV se pierde en presencia de deslumbramiento?

- La AV de bajo contraste o la SC proporciona una medida más sensible que la AV de alto contraste

Adaptación posterior deslumbramiento

- **La adaptación a la luz** tiene lugar después del deslumbramiento.
- La fuente de deslumbramiento induce una post-imagen (escotoma) que posteriormente retrocede y se restaura la visión normal.
- Causa retiniana
 - Blanqueamiento de los fotorreceptores de los conos maculares
- Discapacitante en pacientes con problemas maculares

Adaptación posterior deslumbramiento

Valoración clínica

- **Tiempo de recuperación al deslumbramiento**
(PSRT photostress recovery time)
 - Tiempo requerido para que la mácula vuelva a su nivel normal de función después de haber estado expuesta a una fuente de luz brillante.
- El tiempo de recuperación depende de:
 - La velocidad de regeneración del fotorpigmento.
 - la relación funcional entre los fotorreceptores y el epitelio pigmentario de la retina (EPR).

Tiempo de recuperación del deslumbramiento

- Tiempo de recuperación del deslumbramiento (PSRT)
 - La prueba se realiza normalmente utilizando cartas de letras de alto contraste.
 - PSRT: período de tiempo entre el momento en que se apaga la luz de deslumbramiento y el sujeto puede comenzar de nuevo a leer los optotipos en la carta de VA justo por encima de la agudeza inicial
- Enfermedades del nervio óptico
 - Tiempo de recuperación normal
 - El proceso fotoquímico en los fotorreceptores no está alterado
- Enfermedades maculares
 - Tiempo de recuperación prolongado

Tiempo de recuperación al deslumbramiento

- Causas de un tiempo de recuperación prolongado
 - Cambios en las funciones del complejo epitelio pigmentario – fotorreceptor (oxígeno, nutrientes, vitamina A...) como en la DMAE
 - Alteraciones de la integridad de la coriocapilar, pacientes con mal suministro vascular retiniano: diabéticos, hipertensos...



Gracias